O7 - LE FIBRE OTTICHE

Una fibra ottica è semplicemente un conduttore di luce, in tutto analogo ad una “guida d’onda”, di quelle che si usano nei radar ed altre apparecchiature elettroniche per il convogliamento ed il trasporto di micro-onde (cioè radio-onde a piccola lunghezza d’onda). Le dimensioni trasversali, la sezione, di un guida d’onda devono essere simili alla lunghezza d’onda delle radiazioni che vengono trasportate, per cui si parla sempre di centimetri o decimetri. Nel caso della luce, con lunghezza d’onda dell’ordine di 0,4 - 0,8 μ, il diametro di una fibra ottica può scendere a meno di un micron[53]. 1 micron (μ) = 0,001 mm.

Il principio è sempre lo stesso: il conduttore di luce o di micro-onde deve essere trasparente alle onde ed impedire che esse vengano assorbite dalle pareti o che possano uscire dalla guida. Dunque le onde che viaggiano nella guida devono essere riflesse dalle pareti verso l’interno, colle minime perdite possibili.

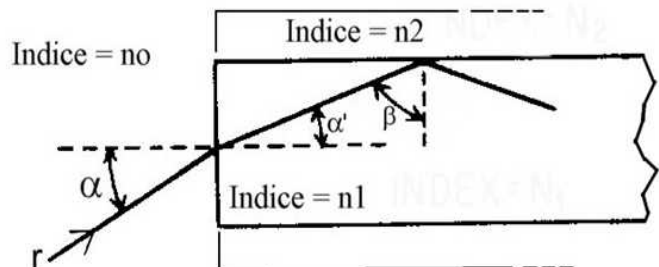
Nel caso delle micro-onde, le pareti sono metalliche e la cavità della guida è piena d’aria od altro gas. Ciò assicura una buona riflessione.

Nel caso della luce, non c’è di meglio che sfruttare il fenomeno della riflessione interna “totale”, di cui si è parlato nell’articolo O2 (I prismi). In linea di principio, tale tipo di riflessione è esente da perdite, quindi una fibra ottica dovrebbe essere soggetta solo alle perdite per imperfetta trasparenza del materiale.

Ma c’è una condizione: per avere la riflessione totale, occorre che la luce viaggi all’interno di un materiale con l’indice più elevato possibile (n1, in fig. 96), limitato da un materiale dall’indice più basso possibile (n2, nella stessa figura). In pratica, il primo materiale è un cilindretto, o un filo, di vetro ad alto indice, detto “nucleo” o “core” (= nucleo, in inglese), circondato da uno strato sottile di vetro ad indice più basso, detto “mantello” o “coating” o “cladding” (= rivestimento). La riflessione totale avverrà per tutti i raggi che incidono sulla superficie del “core” con un angolo (β in fig. 96) superiore all’“angolo limite” (vedi ancora in O2). Possiamo affermare che c’è interesse a lavorare con un angolo limite più piccolo possibile; perché? L’interesse sta nel fatto che i raggi, necessariamente obliqui, che incidono da dentro il “core” sulla superficie dello stesso, se incidono con un angolo (β) inferiore a quello “limite”, vengono rifratti (trasmessi) all’esterno del “nucleo” e pertanto vanno perduti. Più piccolo è l’angolo limite, minori saranno le perdite.

Ma, guarda caso, l’angolo limite è tanto minore quanto maggiore è la differenza di indice fra i due mezzi; ecco perché l’indice del “nucleo” (n1 in figura) deve essere il massimo possibile e l’indice del mantello (n2) il minimo.

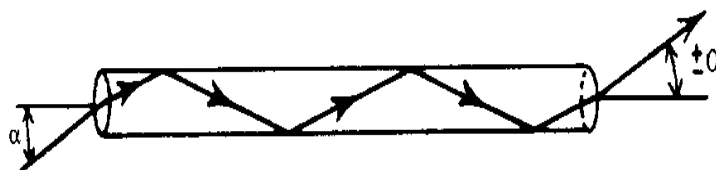
A questo punto, visto che il rivestimento del nucleo deve avere l’indice più basso possibile, perché non servirsi semplicemente dell’aria, che ha un indice appena superiore ad 1,0 ?

Fig. 96
Schema di funzionamento di una fibra ottica. Il rettangolo a linee più grosse, spezzato a destra, rappresenta il cilindro centrale della fibra, il “core”. Le linee orizzontali più sottili indicano il rivestimento ad indice minore n_2 (“cladding”). Il raggio incidente (r) è rifratto sulla superficie di ingresso della fibra ed è riflesso “totalmente” alla superficie si separazione fra “core” e “cladding”.
“n0” rappresenta in genere l’indice dell’aria, che è uguale ad 1.

È semplice: se due fibre (nuclei), semplicemente rivestite di aria, si toccano, nei punti di contatto l’indice da una parte e dall’altra della superficie di contatto è lo stesso e non avviene più riflessione. Il raggio che incidesse su quel punto di contatto uscirebbe dalla fibra ed andrebbe perduto; potrebbe venir “catturato” dalla fibra adiacente, ma allora la radiazione passerebbe da una fibra all’altra senza controllo. Questo passaggio (“cross-talk”) rimescolerebbe i fasci

[53] In realtà, si oscilla fra 5 e 100 μ, sia per difficoltà di fabbricazione, sia perché, con diametri minori, il fenomeno della riflessione totale (vedi sotto) sarebbe disturbato.

trasmessi dalle singole fibre e ciò è esiziale per certe applicazioni, come vedremo. Allora, il rivestimento serve essenzialmente a isolare otticamente una fibra dall'altra; un gran numero di fibre può venir assemblato a costituire un fascio compatto, senza interferenza reciproca.

Abbiamo così capito come funziona una fibra di vetro (o altro materiale trasparente: in certi casi, va bene anche la plastica) col suo rivestimento di materiale meno rifrangente: la luce entra da un estremo, da una delle basi del cilindro (raggio r in fig. 96), e comincia a riflettersi da un punto all'altro della superficie del cilindro, rimbalza di continuo senza poter più uscire dalla fibra finché non raggiunge l'altra estremità, l'altra base del cilindro. Qui, l'angolo d'incidenza sarà assai minore, non avviene più la riflessione totale, e la radiazione può uscire dalla fibra. Lo schema in fig. 97 basta a spiegare come la fibra ottica si comporti come un conduttore di luce a basse perdite.

Fig. 97
Schema complessivo di una fibra ottica; se le facce d'ingresso e d'uscita della fibra (le due basi del cilindro) sono parallele fra loro, l'angolo d'incidenza sulla faccia d'ingresso sarà pari all'angolo di rifrazione (α) e la fibra si comporta come una lamina a facce piane e parallele, salvo il fatto che le riflessioni interne alla fibra possono ruotare il piano di rifrazione in modo imprevedibile ed il fascio complessivo in uscita appare conico.

Dato il basso valore della lunghezza d'onda della luce, le fibre ottiche possono avere un diametro anche di pochi micron, come già accennato. Pertanto, anche se il materiale è rigido, come il vetro, in quelle dimensioni diviene flessibile. Un fascio composto da molte fibre, finché le varie fibre sono libere di scorrere l'una sull'altra, è flessibile anch'esso.

Attualmente, fibre singole o in fasci sono utilizzate per la trasmissione di segnali (suoni, immagini, dati digitali) a grandi distanze, in luogo di tradizionali cavi in rame o di onde radio. I vantaggi sono: la leggerezza, la notevole indifferenza ai disturbi elettromagnetici (scariche, ecc.) e la "larghezza di banda", cioè la possibilità di trasmettere su una singola fibra una gran quantità di informazioni, per esempio numerose conversazioni telefoniche simultanee. La gran larghezza di banda è merito dell'elevata frequenza collegata alla radiazione ottica. Attraverso la fibra ottica viene trasmesso un fascio ottico (che funge da portante) modulato in ampiezza.

Quando le fibre ottiche sono usate per la trasmissione di segnali a grande distanza, si ricorre a lunghezze d'onda particolari nell'infrarosso, cercando il miglior adattamento fra lunghezza d'onda e curva di trasmissione del materiale.

Vediamo ora come realizzare un elementare conduttore di luce a fibra ottica.

Cominciamo a dire che il meccanismo funziona, anche se la sezione della fibra non è circolare, come tacitamente supposto finora, ma poligonale. Sarà più facile per noi realizzare un esemplare sperimentale. Ma non è molto difficile procurarsi un cilindretto di materiale trasparente, tagliando un pezzo di bacchetta di Plexiglas, Perspex o simili, reperibile in un negozio di materiali plastici; si può anche comprare una bacchetta di vetro, di quelle usate nei laboratori di chimica, in un negozio universitario di vetrerie e prodotti chimici. Nel caso della plastica, non è difficile segare un pezzo della bacchetta e levigarne le estremità con carta vetrata sempre più fine, ed alla fine con liquidi per lucidare metalli (del tipo "Sidol"). Un velo d'olio su queste superfici le rende più lisce, o meno diffondenti.

Nel caso del vetro, occorrono abrasivi speciali ed è meglio spezzare la bacchetta; se il taglio è troppo irregolare, riprovare.

In fig. 98 è illustrato un dispositivo generale per la realizzazione di una rudimentale fibra ottica. In S vi è la solita lampadina per auto, 12 V, 21 W, che abbiamo usato altre volte. Una lente d'ingrandimento L, del tipo già usato in altre occasioni, crea una piccola immagine reale del filamento. Si disponga la bacchetta di vetro o plastica su un supporto qualunque, curando solo che un'estremità della bacchetta (I) coincida al meglio con l'immagine del filamento. Dall'altra estremità della bacchetta (U) emergerà il fascio che ha traversato la bacchetta stessa e che si proietta sullo schermo C.

Fig. 98

Dispositivo per illuminare una semplice fibra ottica (FO), ottenuta da un pezzo di bacchetta di Plexiglas.

I ed U sono le superfici d'ingresso e d'uscita della fibra. Lo schermo C raccoglie il fascio emergente da U. Il cerchio scuro che circonda U non è altro che l'ombra della lente L, creata dalla lampadina S. In I si proietta un'immagine concentrata del filamento della lampadina.

Nella fig. 99 seguente, si vede più in dettaglio cosa succede. A parte il fatto che una parte del fascio illuminante sfugge alla faccia d'ingresso (I) e lascia una traccia sul piano d'appoggio (L), va notato che il cartone su cui poggia la bacchetta non è minimamente illuminato; in altre parole, nulla sfugge dalla superficie laterale della bacchetta; tutto merito della riflessione totale. Solo dalla superficie terminale U emerge, a parte qualche perdita accidentale e l'assorbimento della plastica, il fascio che incide sulla superficie I.

Fig. 99

Particolare della fibra ottica FO di fig. 98. Si noti che il fascio illuminante deborda dalla superficie d'ingresso (I) della fibra FO e crea delle tracce chiare (L) ai lati della fibra stessa.

Il cartone bianco su cui poggia la bacchetta di plastica è leggermente inclinato e, per impedire che la bacchetta rotolasse via, è stato posto un blocchetto di ferro su un lato di essa.

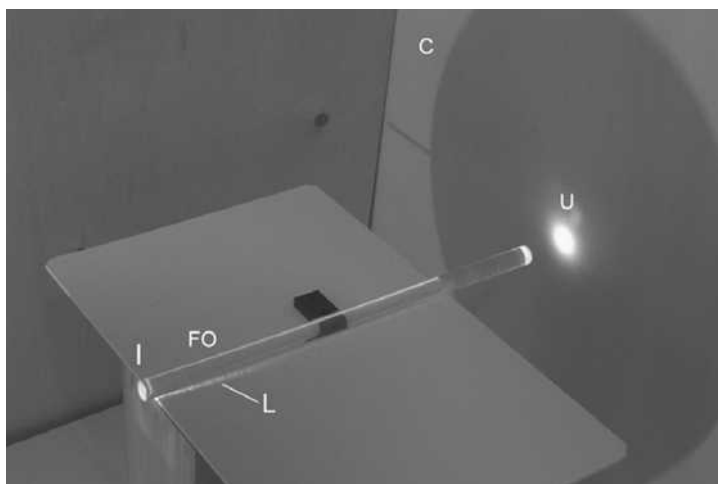
L'estremità I della bacchetta è poco luminosa poiché la sua superficie terminale è lucida e diffonde poco il fascio illuminante. Tale fascio è però intenso, come si vede in U.

Ora proviamo con altri materiali, in particolare con spezzoni di bacchette di vetro. Poiché vogliamo mettere fianco a fianco diversi spezzoni, ci occorre un fascio illuminante più ampio e perciò utilizziamo come sorgente un "faretto", contenente una lampadina "alogena" con specchio. Tale faretto si vede di scorcio a sinistra della fig. 100 (Fa). Sul solito cartone orizzontale sono poggiati tre pezzi di bacchetta di vetro (B) ed una parte del fascio in ingresso (In) emerge dall'estremità opposta delle bacchette (Usc). Il piccolo schermo verticale (Sc) mostra i tre fasci emergenti.

Fig. 100

Tre semplici guide di luce o "fibre ottiche" consistenti in pezzi di bacchette di vetro (B), poggiate su un cartone orizzontale.

Nonostante che il fascio illuminante sia molto ampio ed illumini buona parte del piano d'appoggio, verso l'estremità destra si vede ancora che tale piano non è illuminato dalle fibre; il fascio che attraversa le fibre finisce tutto sullo schermo Sc.

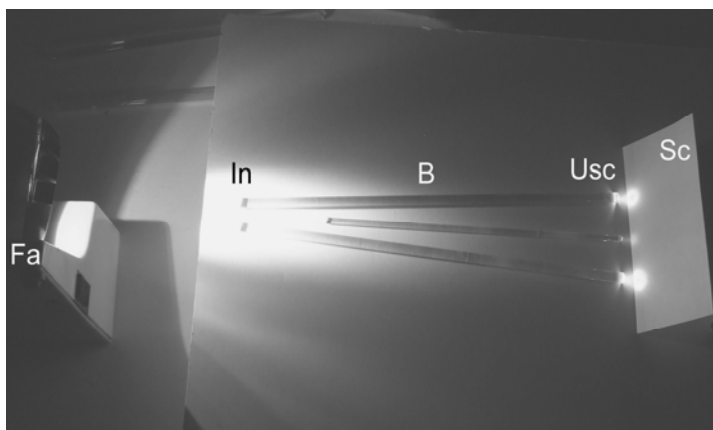



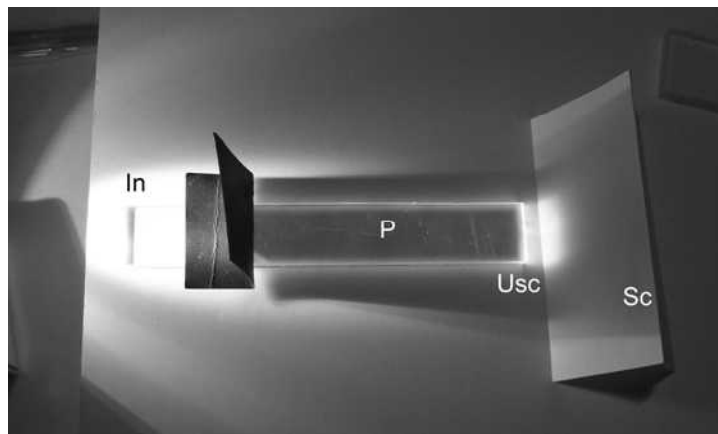
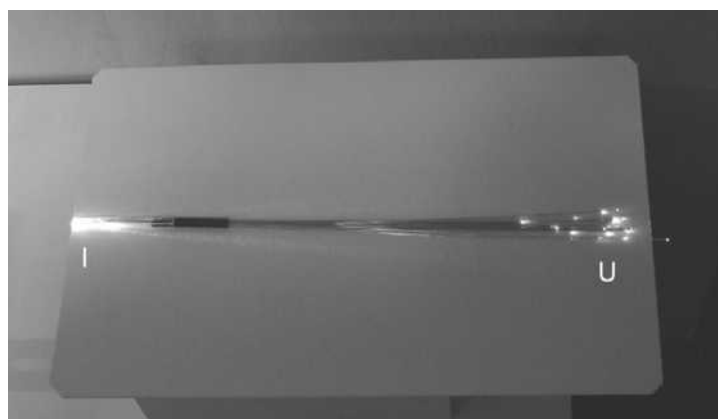
Fig. 101
Conduttore di luce ottenuto da un pezzo di lastra in plastica (P). Qui non si può più parlare di "fibra", ma il principio di funzionamento è lo stesso.
Le superfici laterali del pezzo diffondono un po' di luce, poiché non sono lucide. Per fare un po' d'ombra sullo schermo verticale Sc, è stato posto un pezzo di cartoncino nero sul pezzo P. L'illuminatore è lo stesso faretto alogeno della figura precedente. "In" è la superficie d'ingresso della guida.

Ora tentiamo l'esperimento con materiali meno regolari. In fig. 101 si è realizzato un conduttore di luce laminare, con un pezzo di lastra in materiale plastico. Segando la lastra, le superfici laterali del pezzo risulteranno ruvide, e quindi diffonderanno un po', ma la riflessione totale si avrà ancora sulle superfici inferiore e superiore (ovviamente lucide) ed il fascio che attraversa la guida illumina lo schermo Sc posto presso la sua superficie d'uscita (Usc).

Fig. 102
Fascio di fibre ottiche in plastica. Per l'alimentazione del fascio di fibre si è ricorso alla disposizione di fig. 98: lampadina per auto seguita da una lente d'ingrandimento che crea una piccola immagine reale del filamento. Tale immagine dovrà cadere sulla superficie d'ingresso del fascio (I).
Ogni fibra mostra il fascio emergente come una macchiolina luminosa, in U.

Altra esperienza è possibile procurando una di quelle lampade da tavolo che portano verso l'alto un fascio di sottili filamenti di plastica; tali filamenti s'incurvano sotto il proprio peso e formano qualcosa che somiglia ad uno zampillo d'acqua. All'interno della lampada, un'opportuna sorgente (lampadina alogena, magari con specchio) alimenta (illumina) un'estremità del fascio di "fibre" e l'altra estremità, sparsa a ventaglio come si è detto, apparirà come uno sciame di puntini luminosi. Con una tale lampada non si può nemmeno leggere il giornale ma, si sa, "fa chic".

Recuperando il fascio delle fibre di plastica, lo si può alimentare come si vede in fig. 102 e, all'uscita (U), si vedranno i fasci che hanno traversato le singole fibre.

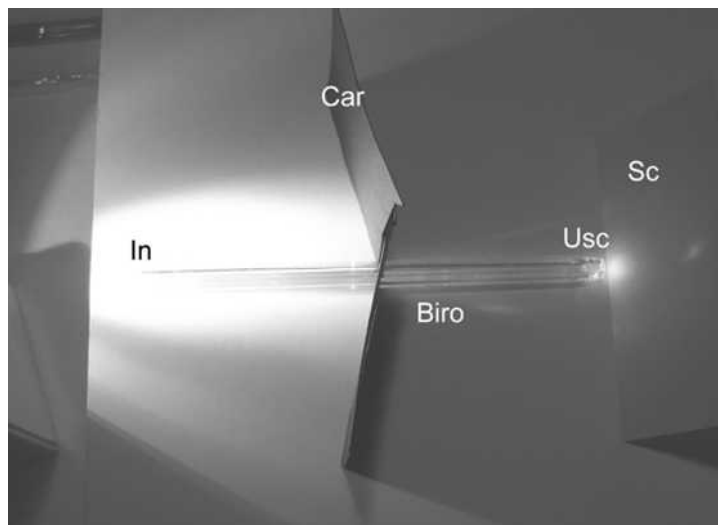
Ancora più semplice è usare come guida di luce la cannuccia di una biro. Occorre solo che sia costituita da plastica trasparente (in genere, polistirolo) e sia privata di tutte le parti opache. La fig. 103 dovrebbe illustrare bene quanto avviene.

Vediamo dunque che qualunque oggetto trasparente limitato, almeno in parte, da superfici lucide, atte a provocare la riflessione interna totale, diventa capace di trasportare un fascio di luce nei luoghi più inaccessibili. Tale possibilità viene sfruttata in pratica in molti dispositivi; generalmente si tratta di guide flessibili, composte da molte fibre sottili, ma il principio è sempre lo stesso. Gli "endoscopi", sotto citati, contengono un fascio conduttore di luce per illuminare la cavità sotto esame, assieme ad un secondo fascio "coordinato" per riportarne indietro un'immagine.

Sistemi coordinati ed incoordinati

Una fibra ottica utilizzata come semplice "conduttore di luce", abbiamo appena detto, può essere costituita da un semplice cilindro di diametro adeguato al fascio ottico incidente; se il

conduttore deve essere flessibile, occorre servirsi di un fascio di fibre (con mantello) più sottili possibile. All'interno di quest'applicazione, poco importa se la posizione reciproca delle varie fibre all'interno del conduttore non è la stessa all'ingresso ed all'uscita.

Fig. 103
Rudimentale guida di luce ricavata dalla cannetta di una "biro" economica. Occorre eliminare la punta scrivente ed il relativo tubetto che porta l'inchiostro; dall'altra estremità, si elimini il tappino di plastica opaca. Per il resto, funziona.
L'alimentazione si può ottenere colla disposizione di fig. 98 o col faretto di fig. 100, come si vede in questa foto.
Affinché lo schermo Sc che raccoglie il fascio d'uscita (Usc) non risulti troppo illuminato dal faretto, è bene disporre uno schermo in cartoncino nero (Car), come si è fatto in fig. 101.

Un tale sistema è detto "incoordinato" o, impropriamente, "incoerente"[54].
In altre applicazioni invece occorre che la disposizione delle fibre all'ingresso sia ripetuta all'uscita; in altre parole, le coordinate di una data fibra nel piano d'ingresso del fascio di fibre devono essere le stesse, quando si cerca la stessa fibra nel piano d'uscita. Se dunque sul piano d'ingresso si proietta un'immagine (reale), si deve ritrovare la stessa immagine sul piano d'uscita. L'unica differenza è che l'immagine in uscita sarà suddivisa in elementi discreti, ogni elemento corrispondendo ad una singola fibra. Questa frammentazione dell'immagine ovviamente ne limita la risoluzione, e quindi questi sistemi sono realizzati con fibre più sottili possibile, compatibilmente con i limiti fisici sopra accennati, con problemi tecnologici e con esigenze di costo.
Un sistema capace di trasmettere un'immagine senza alterarne la struttura è detto "coordinato" o "coerente", ed è naturalmente assai più difficile da costruire.
Un conduttore d'immagine coordinato può essere interposto fra obbiettivo ed oculare di un qualunque strumento ottico (periscopio, cannocchiale, microscopio, ecc.) ed in questo modo il trasporto dell'immagine può avvenire lungo un percorso comunque ricurvo e magari flessibile. Si realizza così tutta una serie di strumenti indicati genericamente come "fiberscope", adatti ad osservare l'interno di cavità altrimenti inaccessibili[55]: vani interrati raggiunti da scavi archeologici, canne di armi da fuoco, interni di motori, recipienti o ambienti inquinati, cavità del corpo umano ecc. L'applicazione più importante è forse proprio in campo diagnostico: si hanno immagini sufficientemente risolte con fasci di fibre del diametro di pochi mm, di estrema flessibilità, capaci di fornire al medico la visione dell'interno di quasi qualunque organo. Questi sistemi vanno sotto il nome di "endoscopi".
Ma, all'interno dell'approccio divulgativo di questi articoli, cosa si può proporre?
La sola cosa che ci è venuta in mente è di sfruttare un minerale, reperibile a pochi Euro presso un buon negozio fornitore di minerali, gemme, fossili, ecc. Si tratta della "ulexite" o "pietra TV" (la ragione di questo strano nome sarà chiara fra poco). Si tratta di un borato misto, di sodio e calcio, che cristallizza in tanti filamenti finissimi, aggregati in grandi masse e perfettamente paralleli fra loro. Naturalmente, affinché avvenga la riflessione totale all'interno dei singoli filamenti, occorre che ognuno di essi sia circondato da uno strato, sia pure sottilissimo, di materiale ad indice inferiore. Nella ulexite del commercio le fibre cristalline sono separate da straterelli di un altro materiale che ha proprio questa caratteristica. I campioni reperibili in negozio sono tagliati con facce parallele, più o meno perpendicolari alle fibre, e quindi si presentano come "conduttori coordinati di immagini".
Il risultato pratico è che la distribuzione di luce presente su una delle facce del campione viene trasportata abbastanza fedelmente sull'altra faccia. Il modo più semplice di verificare il

54 I termini "coerente" ed "incoerente" si applicano più propriamente a fasci di radiazione per indicare il loro stato di coerenza spaziale (costanza di fase su tutto il fronte d'onda) e di coerenza temporale (monocromaticità).
55 Si parla anche di "borescope" = visore per buchi.

fenomeno è poggiare la pietra su una pagina scritta e constatare che la scritta è stata trasportata sulla faccia di sopra. In fig. 104 si vede un campione di ulexite fotografato sotto diverse angolazioni.

Fig. 104 A B C

In A la scritta sottostante è quasi invisibile. La ragione è che la differenza di indice fra i cristalli fibrillari ed il materiale che li circonda è molto piccola; ne consegue che l’angolo limite è molto grande e la riflessione totale si verifica solo per i raggi quasi paralleli alle fibre. Il trucco non ha funzionato poiché l’obbiettivo della fotocamera era troppo inclinato.

In B la fotocamera è stata un po' raddrizzata e le cose migliorano.

In C , con un’inclinazione di una decina di gradi, la scritta è ben visibile. Purtroppo, queste fotografie sono riprese singolarmente, e non danno la sensazione del rilievo. Osservando visivamente la pietra disposta come in fig. 104 C, la visione stereoscopica consentita dai nostri due occhi ci darebbe la sensazione del rilievo e renderebbe molto più percettibile la presenza della scritta sulla faccia superiore della pietra. Il fatto di vedere un’immagine sulla superficie esposta della pietra giustifica il nome, citato prima, di “pietra TV”: la pietra appare come un piccolo “display”.

Molte altre sono le applicazioni delle fibre ottiche, e la tecnologia in questo campo progredisce rapidamente, ma il senso di questi articoli è di proporre esperienze basate su materiali facilmente reperibili e quindi dobbiamo chiudere l’argomento.